

学校编码: 10384

分类号\_\_密级\_\_

学 号: 19920111152723

UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

# 四旋翼无人机室内自主导航系统 的研究与实现

Study and realization on indoor autonomous navigation  
system for quad-copter

白志君

指导教师姓名: 林麒 教授

专 业 名 称: 机械电子工程

论文提交日期: 2014 年 5 月

论文答辩时间: 2014 年 5 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2014 年 月



## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日



## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日



## 摘 要

无人机的导航技术近年来有较大的发展,但大部分的导航技术只适用于室外场地,对于室内导航技术还需要加强深入研究。本文根据室内飞行要求搭建了微型四旋翼无人机,将其作为飞行平台,运用单目视觉辅助系统与激光测距仪开发了室内自主导航系统,并完成无人机系统的室内自主导航。本文的主要工作和创新如下所述。

首先,在比较几种室内导航方法的基础上,结合采纳视觉导航与激光测距仪导航的优点,决定综合运用两者共同服务于室内导航;根据室内飞行环境的要求,通过对比分析,为四旋翼无人机选择“X”字飞行模式与室内导航实现方案;采用单目摄像机、图像传输模块和激光测距仪等组成室内导航系统;根据所选方案构建四旋翼无人机的硬件系统;研究开发包含四旋翼无人机的姿态控制回路、位置控制回路和高度控制回路的飞行控制软件,并将经典 PID 控制应用与四旋翼无人机的飞行控制。

其次,对单目视觉系统的辅助导航进行了研究。根据摄像机成像原理,选择镜头畸变的非线性摄像机模型,通过摄像机标定确定摄像机内参,根据 PnP 问题理论,利用窗口 4 个共面的特征角点来解算进入窗口目标的位姿;采用机器视觉的透视可变形模板匹配方法解算识别密文标志,并确定了密文标志相对无人机的姿态角信息,从而辅助无人机进入目标房间。

然后,利用激光测距仪的数据点集创建局部地图,通过数据匹配实现四旋翼无人机的自定位;根据单目视觉系统提供的信息进行路径规划,从而实现更加智能化的室内自主导航。在进行激光测距仪数据匹配时,采用改进的 ICP 匹配,减少了匹配的计算时间,提高了导航的实时性。

最后,用四旋翼无人机进行了室内导航飞行实验。通过实验验证了四旋翼无人机室内导航系统的可行性,并且实现了在复杂楼道多房间内进入目标房间的任务。

**关键词:** 四旋翼 PID 控制 单目视觉系统 激光测距仪导航 ICP 匹配





## ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) navigation technology has been under great development in recent years. Nevertheless, most of the navigation technology is only applicable to the outdoor venues, thus there is an urgent need for indoor navigation technology research. Based on the flying platform of Quad-copter UAV, set up according to the indoor environment, the indoor autonomous navigation system is developed by the monocular vision assistant system and the laser rangefinder system. The major work and innovation of this paper are described as follow.

Firstly, on the basis of comparison of several indoor navigation schemes and combination of the advantages of visual navigation and laser range finder navigation, both of the two schemes are utilized for indoor navigation. The “X” flying model is adopted in the implementation of indoor navigation through the analysis of the requirement of indoor flying environment. Indoor navigation system hardware, mounted on the quad-copter UAV, such as monocular camera, image transmission module, laser range finder and navigation processor is utilized to implement the indoor autonomous navigation. The Quad-copter UAV hardware system is built according to the selected scheme. Quad-copter UAV flight control software of attitude control loop, position control loop and the altitude control loop is researched, and the classic PID control is applied to control the quad-copter UAV.

Secondly, assistant navigation of the monocular camera system is studied. Determining internal parameters of the camera through camera calibration, calculating pose of the window, according to the theory of PnP problem, with four concurrent planes features angular point of the window, calculating and distinguishing cipher text logo in accordance with the machine vision perspective deformable template matching method, the attitude angle of the cipher text logo relative to UAV is

determined and the UAV is able to enter the target room consequently.

Thirdly, creating local map with the data of laser rangefinder and constructing global map through data matching, thus self-locating of quad-copter UAV is implemented. According to the information provided by the monocular vision system for path planning, more intelligent indoor autonomous navigation is realized. When matching the laser rangefinder data, the improved ICP is utilized and the matching calculation time is reduced, therefore real-time of navigation is improved.

Finally, experiments verify the feasibility of quad-copter UAV indoor navigation system and the mission of entering target room in complex environment with several corridors and rooms is achieved.

**Key words:** Quad-copter; PID control; Monocular vision system; Laser rangefinder navigation; ICP matching.

# 目 录

<b>第一章 绪 论 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 研究背景与意义 .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 室内导航的方法 .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 机器视觉导航.....	3
1.2.2 声纳传感器导航.....	3
1.2.3 激光测距仪导航.....	4
<b>1.3 国内外研究现状 .....</b>	<b>4</b>
1.3.1 国外相关研究.....	5
1.3.2 国内相关研究.....	6
<b>1.4 本文研究内容与章节安排 .....</b>	<b>8</b>
<b>第二章 四旋翼无人机系统总体方案设计 .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 室内导航方法的选择 .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 四旋翼无人机系统总体方案 .....</b>	<b>11</b>
2.2.1 四旋翼无人机的飞行模式.....	12
2.2.2 四旋翼无人机室内导航系统方案.....	13
<b>2.3 四旋翼无人机的硬件组成与硬件系统构建 .....</b>	<b>15</b>
2.3.1 四旋翼无人机的机体及动力.....	16
2.3.2 四旋翼无人机的飞控硬件.....	17
2.3.3 室内自主导航系统硬件.....	19
2.3.4 四旋翼无人机硬件系统构建.....	20
<b>2.4 四旋翼无人机飞行控制软件 .....</b>	<b>22</b>
2.4.1 姿态控制回路.....	22
2.4.2 高度控制回路.....	24
2.4.2 位置控制回路.....	25
<b>2.5 本章小结 .....</b>	<b>26</b>
<b>第三章 单目视觉的位姿测量与模板匹配 .....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 摄像机模型与标定 .....</b>	<b>27</b>
3.1.1 线性摄像机模型几何关系.....	27
3.1.2 非线性摄像机模型.....	32
3.1.3 摄像机标定过程.....	33
<b>3.2 平面目标的位姿测量算法求解 .....</b>	<b>35</b>
3.2.1 PnP 问题理论 .....	35
3.2.2 共面四点模型的线性求解.....	36
3.2.3 相对位姿转换及位姿求解.....	37
<b>3.3 模板匹配 .....</b>	<b>39</b>
3.3.1 平面模板匹配的方法.....	39
3.3.2 几何变换.....	40

3.3.3 图像金字塔加速算法.....	41
3.4 本章小结 .....	42
<b>第四章 基于激光测距仪室内导航的研究 .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 局部地图的创建 .....</b>	<b>43</b>
4.1.1 激光测距仪数据采集与滤波处理.....	44
4.1.2 区域分割与特征提取.....	47
<b>4.2 路径规划 .....</b>	<b>50</b>
4.2.1 调头模式.....	50
4.2.2 直行模式.....	51
4.2.3 绕弯模式.....	52
<b>4.3 改进的 ICP 匹配算法 .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 经典 ICP 算法 .....	53
4.3.2 改进的 ICP 算法 .....	57
<b>4.4 全局地图的创建 .....</b>	<b>61</b>
<b>4.5 本章小结 .....</b>	<b>62</b>
<b>第五章 四旋翼无人机室内导航系统实验 .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1 四旋翼无人机飞行控制实验 .....</b>	<b>63</b>
5.1.1 四旋翼无人机的高度和姿态环实验.....	63
5.1.2 四旋翼无人机位置环实验.....	69
<b>5.2 单目视觉辅助导航系统实验 .....</b>	<b>70</b>
5.2.1 窗口目标定位.....	70
5.2.2 密文标志识别.....	77
5.2.3 立体目标的定位.....	79
<b>5.3 激光测距仪导航系统实验 .....</b>	<b>80</b>
5.3.1 局部地图的创建.....	80
5.3.2 路径规划.....	81
5.3.3 改进的 ICP 匹配与全局地图的创建 .....	82
<b>5.4 整机实验 .....</b>	<b>83</b>
<b>5.5 本章小结 .....</b>	<b>84</b>
<b>第六章 总结与展望 .....</b>	<b>86</b>
6.1 总结 .....	86
6.2 展望 .....	87
<b>参考文献 .....</b>	<b>88</b>
<b>攻读学位期间发表的成果目录 .....</b>	<b>94</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>95</b>

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Preface.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Research background and significance .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Indoor navigation method .....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Machine vision navigation.....	3
1.2.2 Sonar sensors navigation.....	3
1.2.3 Laser rangefinder navigation .....	4
<b>1.3 Overseas and Domestic Research Status .....</b>	<b>4</b>
1.3.1 Foreign Research .....	5
1.3.2 Domestic Research.....	6
<b>1.4 Research content and chapter arrangement .....</b>	<b>8</b>
<b>Chapter 2 Quad-copter UAV system overall scheme design .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Choice of indoor navigation methods .....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Quad-copter UAV system overall scheme .....</b>	<b>11</b>
2.2.1 Quad-copter UAV flying mode .....	12
2.2.2 Quad-copter UAV indoor navigation system solutions.....	13
<b>2.3 Hardware composition and construction hardware system .....</b>	<b>15</b>
2.3.1 Body and power of Quad-copter UAV.....	16
2.3.2 Flight control hardware of Quad-copter UAV .....	17
2.3.3 Indoor autonomous navigation system hardware .....	19
2.3.4 Construction hardware system of Quad-copter UAV .....	20
<b>2.4 Flight control software of Quad-copter UAV .....</b>	<b>22</b>
2.4.1 Attitude control loop .....	22
2.4.2 Height control loop .....	24
2.4.2 Position control loop .....	25
<b>2.5 Brief summary .....</b>	<b>26</b>
<b>Chapter 3 Monocular pose measurement and template matching ....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Camera model and calibration.....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Linear camera model.....	27
3.1.2 No-linear camera model.....	32
3.1.3 Calibration process of camera.....	33
<b>3.2 Planar target pose measurement algorithm .....</b>	<b>35</b>
3.2.1 PnP problems theory .....	35
3.2.2 Solution of the coplane four-point linear model .....	36
3.2.3 Relative pose and attitude angle .....	37
<b>3.3 Template matching .....</b>	<b>39</b>
3.3.1 Plane template matching method .....	39
3.3.2 Geometric transformation .....	40

3.3.3 Image pyramid acceleration algorithm .....	41
3.4 Brief summary .....	42
<b>Chapter 4 Research of laser rangefinder indoor navigation .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Creation of local map .....</b>	<b>43</b>
4.1.1 Laser rangefinder data acquisition and filtering processing .....	44
4.1.2 Regional segmentation and feature extraction .....	47
<b>4.2 Route planning.....</b>	<b>50</b>
4.2.1 Turn-back mode .....	50
4.2.2 Straight mode .....	51
4.2.3 Roundabout mode .....	52
<b>4.3 Improved ICP matching algorithm.....</b>	<b>53</b>
4.3.1 Classics ICP algorithm.....	53
4.3.2 Improved ICP algorithm .....	57
<b>4.4 Creation of a global map.....</b>	<b>61</b>
<b>4.5 Brief summary .....</b>	<b>62</b>
<b>Chapter 5 Quad-copter UAV indoor navigation experiment.....</b>	<b>63</b>
<b>5.1 Quad-copter UAV flight control experiment .....</b>	<b>63</b>
5.1.1 The height of Quad-copter UAV and position loop experiment .....	63
5.1.2 Quad-copter UAV position loop experiment .....	69
<b>5.2 Monocular visual aided navigation system .....</b>	<b>70</b>
5.2.1 Target window position measurement .....	70
5.2.2 Cipher text logo recognition .....	77
5.2.3 Three-dimensional target positioning .....	79
<b>5.3 Laser rangefinder navigation system experiment .....</b>	<b>80</b>
5.3.1 Creation of local map.....	80
5.3.2 Route planning .....	81
5.3.3 The improved ICP matching and the creation of a global map .....	82
<b>5.4 Whole machine experiment .....</b>	<b>83</b>
<b>5.5 Brief summary .....</b>	<b>84</b>
<b>Chapter 6 Conclusion and prospect.....</b>	<b>86</b>
6.1Conclusion.....	86
6.2Prospect .....	87
<b>References .....</b>	<b>88</b>
<b>Publications .....</b>	<b>94</b>
<b>Acknowledgments .....</b>	<b>95</b>

## 第一章 绪 论

### 1.1 研究背景与意义

自动化在飞机驾驶的应用是科技的一个重大进步,加上微电子、微机电技术、信息技术、智能技术和航空技术的飞跃发展,使无人机 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)得以迅速发展。无人机是无人驾驶飞行器的统称,以无线遥控或嵌入式程序控制代替人工完成各种任务,凭借着其体积小、成本低、隐蔽性好、使用方便、对飞行环境要求低、生存能力强等优点,在军事领域和民用领域得到了广泛的应用。在几次的局部战争中,无人机在侦查、攻击、电子对抗等方面发挥了重要的作用,在未来的战争中,无人机有着更重大的意义,世界各军事国家加紧对无人机的研制。在民用方面,无人机在空中航拍、灾情监控、通讯中继、气象探测、交通巡逻以及农药喷洒等的应用越来越广泛<sup>[1]</sup>。

无人机导航系统是无人机系统的关键组成部分之一,目前无人机使用的导航技术主要有惯性导航、卫星导航、多普勒导航、视觉导航、地形辅助以及地磁场导航等<sup>[2]</sup>。在实际应用中,需要根据无人机的飞行环境、担负的任务以及导航技术的适用范围和使用条件等特点选择合适的导航系统<sup>[3]</sup>。

近年来,无人机的导航技术研究有较大的飞跃,但是大部分的导航技术只适用于室外空旷的场地,无法适用于室内未知环境的导航。室内导航的环境具有未知性和复杂性。所谓未知性,表现在无人机对于室内环境一无所知,不知道室内环境的大小、障碍物的形状与分布、而且无任何人工设置的参照物。而复杂性则表现在无人机处于很多不确定性和随机性的环境中,如障碍物的随机布置或相互遮挡,室内光照因无人机不同角度拍摄而发生变化等。当今各国对室内未知环境的导航控制也展开了一些研究,但尚未形成统一完善的体系,还有许多关键理论和技术尚未解决和完善。这些问题主要有室内环境的建模、无人机的定位、无人机的导航控制器的调整、实时运动控制、导航控制方法等技术问题。

无人机的室内导航控制能力扩大了无人机应用的范围,同时提高了无人机躲避障碍的能力,以及无人机的机动性、智能性。无人机的室内飞行技术对于反恐

侦查，室内营救、拾取室内目标等具有重要意义。

室内环境对无人机的机型大小和承载重量提出了更加微型化的要求。无人机可分为无人直升机、固定翼无人机和多旋翼无人机等。固定翼无人机在室内环境中的飞行控制较难实现，固定翼无人机要求飞行速度较快以保证有足够的升力，同时固定翼无人机需要起降跑道，飞行速度导致所需的转弯半径较大，不适合在狭小的空间中飞行。对于室内环境，旋翼无人机有着十分明显的优势，具有垂直起降、空中悬停、超低速飞行、机动性能好等优点。

旋翼无人机有多旋翼无人机和单旋翼无人机（即无人直升机）两大类。多旋翼无人机比单旋翼无人机的控制方式更为简单，可通过对角线的转向相反的旋翼来相互抵消反扭力矩，而单旋翼无人直升机则需要靠专门的尾桨来平衡反扭力矩。多旋翼无人机通过改变对称分布的旋翼转速来调整姿态与位置。单旋翼无人直升机在飞行控制时虽只需调节单个旋翼的倾角，但需要同时控制姿态和位置，更难控制。本文研究的室内导航是以四旋翼无人机为飞行载体，适合在室内环境比较复杂，障碍物多，空间较小等条件下飞行。

## 1.2 室内导航的方法

用于室内飞行的无人机由于环境空间所限，机体都比较小。因此，在室内环境中，小型无人机由于其内腔较小，往往采用微机电惯性导航装置。微机电惯性导航依靠内部的加速度计测得三个轴向的运动加速度，积分运算后得到无人机位置信息，在短时间内有很高的定位精度。但微机电惯性系统的零漂较严重，随着时间的延长，误差积累使得测量精度不断降低，从而逐渐偏离准确值，不宜单独使用。

航姿参考系统 AHRS（Attitude and Heading Reference System）传感器测量的姿态信息可以用来控制无人机的稳定飞行。但 AHRS 传感器测量的位置信息无法实现高精度的航迹控制，需要与其它传感器配合使用。

距离检测传感器是无人机获取外界环境信息的主要手段，目前室内环境导航常用的测距传感器有机器视觉、声纳传感器和激光测距仪<sup>[4]</sup>。



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”. Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库